Revista del Instituto de Investigación FIGMMG
Vol 7, N.° 13, 37-44 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos
ISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico)

PROTECCIÓN CATÓDICA-DISEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Samuel Rosario Francia*

RESUMEN

La protección catódica consiste en obligar a la estructura a funcionar como un cátodo en una celda de corrosión, mediante la manipulación y/o modificación de factores electroquímicos. Un ánodo galvánico, también llamado ánodo de sacrificio, si se conecta eléctricamente a una estructura sumergida descargará una corriente que fluirá a través del electrolito hasta la estructura que se pretende proteger. Para cumplir con este objetivo, los ánodos deben cumplir con ciertas características de peso, dimensiones, forma geométrica. Este trabajo pretende conducir al ingeniero de diseño de sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio a obtener el ánodo adecuado mediante un método simple.

Palabras clave: Protección catódica, ánodo de sacrificio.

CATHODIC PROTECTION-DESIGN OF SACRIFICIAL ANODES

ABSTRACT

Cathodic protection consists in forcing a structure to work as a cathode in a corrosion cell, through the manipulation and/or modification of electrochemical factors. A galvanic anode, also called sacrificial anode, if is electrically connected to a submerged structure, will discharge a current that will flow through the electrolyte to the structure that we intend to be protected. To accomplish this goal the anodes should have certain characteristics of weight, dimensions and geometric shape. This article intends to guide the cathodic protection systems design engineer to obtain the appropriate anode through a simple method.

Keywords: Cathodic protection, sacrificial anode.

I. INTRODUCCIÓN

«Corrosión es la destrucción de un cuerpo sólido causada por un ataque no provocado, de naturaleza química o electroquímica que se inicia en la superficie» [1, 2].

Esta es la definición más generalmente aceptada, originaria del «Reichanschuss für Metallschutz». En cualquier caso, la corrosión es un proceso destructivo en lo que a ingeniería se refiere, y representa una enorme perdida económica.

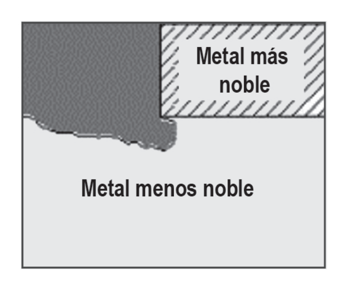
Teniendo en cuenta la Serie Electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de él en esta serie. Así, por ejemplo, el fierro será anódico respecto al cobre y catódico respecto al zinc (Véase Tabla N.º 1).

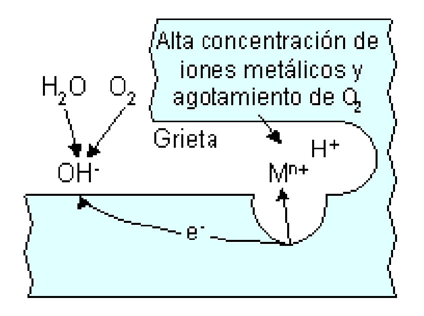
El metal que actúa como ánodo se sacrifica a favor del que actúa de cátodo, por eso a este sistema se le conoce como protección catódica por ánodo de sacrificio. Aunque la mayoría de los ánodos se fabrican por colada o por gravedad, algunos ánodos se fabrican por colada continua o extrusión. El método de colada produce la apariencia y estructura física del ánodo y, por tanto, su comercialización y desempeño. Desde el punto de vista del desempeño, el ánodo debe ser colado para que el metal solidifique sin segregaciones de constituyentes de aleación. Tampoco no

* Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica-Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú. E-mail: srosariof@unmsm.edu.pe

debe tener inclusiones de materia extraña, sopladuras ni rechupes. Si esto último ocurre, entonces aumentará el riesgo de que el ánodo tienda a pasivarse o desintegrarse físicamente. La figura N.º 1 muestra como se realiza la corrosión.

- Debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, es decir, no debe desarrollar películas pasivantes u obstructoras con los productos de corrosión y tener una fuerte sobretensión de hidrógeno.





Fenómeno anódico: $E_{d1} \leftrightarrows E_{c1} + ne-$

Fenómeno catódico: $E_{c2} + ne- \leftrightarrows E_{d2}$

Figura N.º 1. Corrosión y mecanismo de la corrosión.

Tabla N.º I. Serie electroquímica de los metales (Electrodo de referencia el de hidrógeno normal).

Iones en solución	Potencial (voltios)		Iones en solución	Potencial (voltios)
Li^+	- 3022		Co^{++}	- 0,29
Rb^+	- 2924		Ni^{++}	- 0,22
K^+	- 2925		Sn^{++}	- 0,136
Ca^{++}	- 2,87		Pb^{++}	- 0,129
Na+	- 2715		H^+	0,000
Mg^{++}	- 1866		Bi^{+++}	+ 0,226
Al^{+++}	- 1,67		Cu^{++}	+ 0,344
Zn^{++}	- 0,762		Te^{++++}	+ 0,558
Cr^{++}	- 0,71		Hg^{++}	+ 0,798
Fe^{++}	- 0,441		Ag^+	+ 0,799
Cd^{++}	- 0,397		Pt^{++}	+ 1,2
Ti^+	- 0,336		Au^{+++}	+ 1,12

II. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO [3]

Desde el punto de vista técnico y económico, un ánodo tiene que reunir una serie de propiedades esenciales como las siguientes:

- Tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura (en el caso del acero a -0,8 V).
- El material debe tener un elevado rendimiento eléctrico en A/h kg.
- El ánodo deberá corroerse uniformemente.
- El metal será de fácil adquisición y deberá poder fundirse en diferentes formas y tamaños.
- El metal deberá tener un costo razonable, de modo que unido con otras características electroquímicas se pueda conseguir la protección a un costo razonable por amperio/año.

III. ALEACIONES PARA ÁNODOS DE SACRIFICIO

La composición química de los ánodos de sacrificio incide en el comportamiento de ellos y particularmente sobre las propiedades que las caracterizan:

- Potencial de disolución.
- Rendimiento de corriente.
- Polarización.
- Homogeneidad de la corrosión anódica.

Asimismo, la composición química ejerce influencia sobre las propiedades del producto de corrosión como:

- Porosidad.
- Adherencia.
- Dureza.
- Conductividad eléctrica.

3.1. Composición química de los ánodos de sacrificio [4, 5]

La norma A.S.T.M.- B6-46 y la especificación norteamericana U.S. Mil-A 18001 H definen la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio. Tabla N.º 2 (Véase Anexo 1).

IV. DISEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Es necesario decidir sobre el tamaño de los ánodos que darán la corriente eléctrica requerida. Muchos fabricantes publican la corriente eléctrica de su gama de productos estándar a una determinada resistividad del agua que normalmente es de 25 a 30 Ohm-cm, pero muchas veces es necesario diseñar ánodos para aplicaciones específicas y también puede requerirse la utilización de los ánodos en aguas con otra resistividad. Por tanto, se necesita calcular la corriente individual.

El diseño de ánodos de sacrificio para proteger estructuras, estructuras sumergidas, así como submarinos y barcos requiere el conocimiento de la resistencia ohmica de éstos, aplicando la Ley de Ohm, estimando la corriente de salida y evaluando el número de ánodos requerido en la fase de diseño y más tarde, verificando si los ánodos instalados son los más adecuados. Las fórmulas de resistencia usadas en protección catódica y de mayor uso se detallan en la Tabla N.º 3.

Generalmente la ecuación modificada de Dwight es la más usada para el ánodo tipo barra o ánodos delgados (de sección transversal rectangular o trapezoidal), libremente suspendidos o separados de la plataforma, sin embargo se puede aplicar para ánodos montados apoyados al mismo nivel de la superficie a proteger. La ecuación de McCoy fue expuesta para determinar la resistencia del ánodo basado en la superficie expuesta y sin considerar la forma geométrica. Se recomienda para ánodos tipo brazalete, también se aplica en ánodos montados al mismo nivel de la superficie a proteger. La ecuación de Waldron y Peterson se usa para ánodos rectangulares y planos con respaldo de madera, brazalete seccionado sobre línea de tubos y estructuras. La fórmula de Lloyd´s ha sido propuesta para el tipo de ánodo de placa delgada expuesta por un solo lado, aunque puede aplicarse a brazaletes y montados al mismo nivel de la superficie a proteger.

4.1. Cálculo de la resistencia

De la ecuación de Dwight, la resistencia de un ánodo de forma cilíndrica en un electrolito es igual a la resistividad específica del electrolito y a algunos factores relacionados con la forma geométrica del ánodo.

Tabla N.º 2. Fórmulas de resistencia de mayor uso en la protección catódica en estructuras sumergidas.

Nombre	Fórmula	
Modificada de Dwight	$R = \frac{\rho}{2\pi L} . Ln \frac{4L}{a} - 1$	ρ = Resistividad específica del agua de mar (ohm-cm). L = Longitud del ánodo (cm).
McCoy	$R = \frac{0{,}315 \, .\rho.}{\sqrt{A}}$	a = Radio efectivo medio del ánodo (A = área de la sección transversal / π (cm).
Waldron y Peterson	$R = \frac{\rho}{0{,}58 \, A^{0{,}727}}$	A = área de la superficie expuesta del ánodo (cm^2).
LLoyd´s	$R = \frac{\rho}{2S}$	S = Media aritmética de la longitud y ancho del ánodo (cm).

$$R = \rho \frac{K}{L} . \left(Ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \Rightarrow R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(Ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde:

R = Resistencia ánodo-electrolito (Ohm).

r = Resistividad del electrolito (Ohm-cm).

K = 1/2p (0,159 si L y a están en cm; 0,0627 si L y a están en pulgadas).

L = Longitud del ánodo.

a = Radio equivalente del ánodo. Para otras formas diferentes al cilindro.

a = $C/2\pi$, donde C, es el perímetro de la sección transversal. Así, para una sección transversal de 10 x 10 pulgadas; C= 40 y a = $40/2\pi$ = 6,37

Para determinar la corriente de salida de un ánodo se emplea la ley de Ohm I = E / R.

Algunos criterios para determinar la resistencia de ánodos para protección catódica en estructuras sumergidas como la resistividad, clorinidad del agua de mar se presentan en las tablas N.º 4 y 5 (Material Perfomance, mayo de 1983).

La ecuación de Dwight es válida para ánodos de zinc y aluminio cuando 4L/R e» 16; para ánodos donde 4 L<16 o para ánodos que no se aproximan a la forma cilíndrica. Ecuaciones como la de McCoy u otra versión de la ecuación Dwight pueden predecir mejor la corriente de salida de los ánodos.

Teóricamente para un ánodo cilíndrico en agua de mar, la ecuación correcta sería:

$$R = \rho \frac{K.}{L} \left[Ln \left(\frac{2L.}{a} \right) - 1 \right] \qquad (2)$$

Sin embargo, la primera ecuación es la más empleada.

4.2. Cálculo de la corriente de salida

La Tabla N.º 2 nos da valores de la cantidad de metal del ánodo que se consume, calculado de acuerdo a la Ley de Faraday. Ésta se expresa así:

$C_{onsumida}$ = Velocidad de consumo x tiempo de vida x Intensidad de corriente

$$M = V_c \times \theta \times I_a. \qquad (3)$$

Tabla N.º 3. Resistividad del agua de mar en diferentes partes del mundo.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño mA / m2	Densidad de corriente típica para diseño mA / ft2
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

Tabla N.º 4. Valores de resistividad en función de la temperatura y clorinidad.

Clorinidad	Temperatura °C					
p.p.m.	0	5	10	15	20	25
19	35,1	30,4	26,7	23,7	21,3	19,2
20	33,5	29,0	25,5	22,7	20,3	18,3

Con las ecuaciones de Dwight y Ohm tenemos la ecuación 4:

$$I_a = \frac{\Delta E}{\frac{0,0627.}{L} \rho_m \left(Ln \frac{4L.}{a} - 1 \right)} \Rightarrow I_a = \frac{\Delta E}{0,0627 \rho_m \left(Ln \frac{4L.}{a} - 1 \right)}$$

4.3. Cálculo del número de ánodos y su duración

Para conocer el número de ánodos que se van a necesitar para llevar a efecto la protección catódica, es fundamental determinar la intensidad total de corriente necesaria, la superficie a proteger y conocer la densidad de corriente de protección (Tabla N.º 5).

Es conveniente, cuando se calcula la superficie de la estructura a proteger, observar si existe en ella posibles zonas de «sombra», motivadas por refuerzos o cualquier otra circunstancia, ya que hay que tener muy en cuenta estas zonas en el momento de hacer la distribución de los ánodos, de lo contrario estarán sometidas a la acción de la corrosión. La intensidad total necesaria para protegerla está dada por:

$$I_{total} = d_{corriente} \text{ x área a proteger} \qquad (5)$$

Debemos tener en cuenta que cuando la estructura se encuentra con áreas mojadas y fangosas se calculan separadamente y luego se suman obteniéndose el total de corriente necesaria.

$$I_{área\ mojada} = d_{corriente\ en\ electrolito} \text{ x área mojada a proteger}$$

$$I_{área\ fangosa} = d_{corriente\ en\ fango} \text{ x área fangosa a proteger}$$

Como por la ecuación (4) tenemos la intensidad de corriente que es capaz de suministrar cada ánodo, tendremos que:

$$N_{ánodos} = I_{total} / I_a . \qquad (6)$$

Otro factor a tener en cuenta es la **vida de los ánodos**. La vida para cada valor de I será en función del peso del ánodo y no del número que pudiera ser colocado. Así, pues, si conocemos la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo $\mathbf{I_a}$, su peso (kg), teniendo en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente (Tabla N.º 2), así como su rendimiento y su factor de utilización, se calcula la vida del ánodo. El factor de utilización F_u puede ser el 85%, ya que cuando un ánodo se ha consumido en ese porcentaje debe sustituirse porque el material restante es insuficiente para mantener un porcentaje razonable de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar. El cálculo es el siguiente:

$$\text{Vida} = \frac{C_{orriente} \text{ x P x } \eta \text{ x } F_u}{I_a} \qquad (7)$$

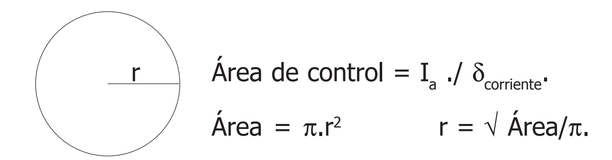
Corriente = Capacidad de corriente
= Amp. Año / kg
P = Peso (kg)
η = rendimiento
F_u = Factor de utilización

Tabla N.º 5. Densidades de corriente de protección en distintos medios agresivos.

Estado superficial	Medio agresivo	Densidad de corriente	
		mA / m²	mA / ft²
Acero desnudo	Agua de mar Velocidad 0,5 m / s	86-130	8,0-12,0
Acero desnudo	Agua de mar velocidad 1 - 15 m / s	150 600	14-56
Acero pintado (epoxi, vinílica, clorocaucho)	Agua de mar	25-35	2,3-2,5
Acero pintado sujeto a roces de fondo	Agua de mar	50-210	5,0-20,0
Acero pintado (aluminio bituminoso)	Agua de mar	35-50	3,25-5,0
Tanque carga lastre petróleo	Agua de mar	100	9,0
Tanque carga lastre ligero	Agua de mar	170	16
Tanque carga lastre limpio	Agua de mar	190	18
Acero desnudo	Agua dulce estancada	56	5,2
Acero desnudo	Agua dulce en movimiento	56-66	5,2-6,0
Acero desnudo	Agua dulce turbulenta/caliente	56-170	5,2-16

4.4. Radio de acción del ánodo

Cada ánodo protege un área determinada que se determina por la relación I_a ./ $\delta_{corriente}$.



Área de control = I_a ./ $\delta_{corriente}$.

Área = $\pi.r^2$ r = $\sqrt{}$ Área/π.

4.5. Métodos de fijación

Los ánodos se fijan en la estructura a proteger por distintos procedimientos, con la ayuda del alma que los atraviesa, tipo platina, varilla o barra de acero que se suelda, o con grapas, espárragos o simplemente atornillados; en este caso la corriente calculada disminuirá en un 20 ó 25% aproximadamente. Su distribución está en función del área que protege cada ánodo, en batería o agrupados, dependiendo de las condiciones particulares de la zona. Así se forman baterías en la popa de un barco, en el quillote y en la pala de timón.

V. CONCLUSIONES

- En la actualidad, está universalmente aceptado que la protección catódica es una guía tecnológica valiosísima para la economía, en la construcción y explotación de estructuras metálicas sumergidas o enterradas.
- La protección catódica por ánodos de sacrificio es uno de los método más usados para minimizar los efectos de la corrosión.
- La protección catódica no es una ciencia exacta; los cálculos finales se basan en una densidad de corriente que ha demostrado ser la correcta en un área particular o bajo condiciones específicas.
- Para la selección del material del ánodo se tiene en cuenta la serie electroquímica de los metales, los cuales tendrán carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de ellos en esta serie.
- La composición química tiene una gran importancia en el comportamiento general, actuando muy directamente en las propiedades que determinan su utilización como ánodo: potencial de disolución, rendimiento de corriente, polarización y homogeneidad de la corrosión anódica.
- Decidida cual es la densidad de corriente adecuada para la protección, es necesario:
  - √ Calcular el requerimiento total de corriente.
  - √ Seleccionar el material más adecuado para la aplicación.
  - √ Calcular el peso total de material requerido y el tamaño idóneo del ánodo para obtener la vida prevista con la corriente eléctrica requerida.
  - √ Decidir sobre el método de fijación apropiado.
  - √ Planificar la posición del ánodo para asegurar la protección adecuada en todas las áreas.

VI. RECOMENDACIONES

- No pintar los ánodos.
- Una vez instalados los ánodos deberá verificarse, mediante la toma de potenciales con un electrodo de referencia Ag/AgCl, su comportamiento periódicamente durante su tiempo de vida.
- Los investigadores de la universidad en este campo de la ingeniería deben trabajar en coordinación con las empresas que requieren este tipo de servicio para garantizar la selección y eficiencia del sistema.

ANEXO - 1

Tabla 2. Propiedades de los ánodos de sacrificio.

	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
Propiedad	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd = 0,025 - 0,15 Al = 0,10 - 0,50 Fe = 0,005 máx. Pb = 0,006 máx. Cu = 0,005 máx. Si = 0,125 máx.	Cu = 0,1 máx. Al = 5 – 7 Si = 0,3 máx. Fe = 0,003 máx. Mn = 0,15 mín. Ni = 0,003 máx Zn = 2 – 4 Otros = 0,3 máx.	Si = 0,11 - 0,21 Fe = 0,10 máx. Zn = 0,3 - 0,5 Sn = --- Mg = --- Hg = 0,02 - 0,05 In = --- Cu = 0,006 máx. Otros = 0,02 máx.	Si = 0,10 máx. Fe = 0,13 máx. Zn = 3,5 - 5,0 Sn = --- Mg = 0,3 - 0,8 Hg = --- In = 0,02 - 0,05 Cu = 0,006 máx. Otros = 0,02 máx.	0,10 máx. Fe = 0,13 máx. Zn = 4 - 5 Sn = 0,08 - 0,16 Mg = --- Hg = --- In = --- Cu = 0,01 máx. Otros = 0,02 máx.
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de trabajo mV vs Ag / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs acero protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad eléctrica teórica A-h / kg (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1290)	2700 (1231)	variable
Capacidad eléctrica real A-h / kg (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2689 (1226)	2430 (1110)	variable,
Consumo ánodo kg / A-año lb / A-año	 11,00 23,8	 8,00 17,5	 3,00 6,8	 10,00 21,9	 5,50 12
Densidad kg / dm3 lb / pulg.3	 7,3 0,258	 1,77 0,063	 2,75 0,098	 2,81 0,10	 2,81 0,10

ANEXO - 2

Para proteger una estructura sumergida, ánodo de sección cuadrada.

Material-aleación de zinc U.S. MIL A-18001-H

Consumo teórico, según Faraday 23,61 lb / Amp. Año

Intensidad del ánodo 2,0 Amperios; tiempo de vida 1,5 años.

Peso del ánodo: 2 Amp x1,5 años x 23,61 lb/Amp. Año = 70,83 = 71 lb.

Para una tubería sumergida, un ánodo de L = 48"

Resistividad del medio 25 W-cm

Con la ecuación de Dwight obtenemos el radio efectivo:

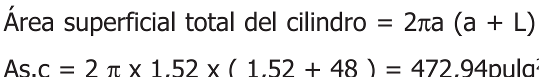
$$2{,}0\ \text{Amp} = \frac{0.25\ \text{volt x 48 pulgadas}}{0{,}0627 \times 25\left(\text{Ln}\ \frac{4 \times 48}{a} - 1\right)}$$

a = 1,52 pulgadas.

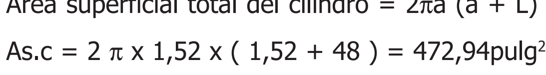
.a^2

2 aL

a^2



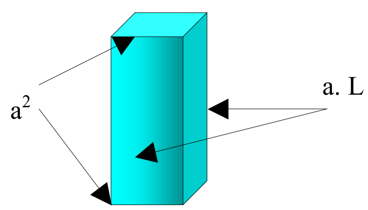
Área superficial total del cilindro = $2\pi a\,(a + L)$



As.c = $2\ \pi \times 1{,}52 \times (1{,}52 + 48) = 472{,}94\text{pulg}^2$

Área superficial del prima de sección cuadrada = $4\ b \times L + 2\ b^2$.

Como las áreas son equivalentes:

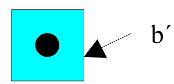


$472{,}94 = = 4\ b \times L + 2\ b^2$.

Resolviendo se tiene: b = 2,4 pulgadas

Peso real = $(2{,}4 \times 2{,}4 \times 48)\ \text{pulg}^3 \times 0{,}257\ \text{lb / pulg}^3 = 71{,}06$ libras.

Como el ánodo para sujetarse lleva un alma de acero (barra de 1 pulg. de diámetro), el lado del ánodo se incrementa para no disminuir el peso de zinc calculado, de manera que el nuevo lado b´ será:



$(2,\ 4 \times 2,\ 4)\ \text{pulg}^2 + p/4\ (d)^2 = (2{,}4 \times 2{,}4)\ \text{pulg}^2 + 0{,}785\ \text{pulg}^2 = 6{,}545\ \text{pulg}^2$.

b´= 2, 6 pulgadas,

Como se puede ver, el peso del ánodo es bastante próximo al calculado por la ecuación de Faraday. Se puede hacer el cálculo para otras formas geométricas, por ejemplo de sección trapezoidal.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Kemal Nisancioglu. «Cathodic Protection». *Rev. Material Perfomance,* diciembre, 1984.
2. La protección catódica y sus aplicaciones. *Corrosión y Protección,* vol. 1, N.° 1, 1988.
3. Protección Catódica con ánodos galvánicos. http://lectura.ilce.edu.mx.
4. Roe Stommen. «Anode Resistance». *Rev. Material Perfomance,* Marzo, 1985.
5. Wilson Walton Internacional de Venezuela. *Corrosión y Protección Catódica.*